

AN: PAT 1999-303597

TI: Magnetic flux measurement system has measuring sensor with conducting detector coil and measurement signal processor with SQUID sensor, which is electrically connected to measuring sensor

PN: DE19748556-A1

PD: 20.05.1999

AB: The system includes a measuring sensor (2) and a measurement signal processing unit (3), which comprises a SQUID sensor (5) that is electrically connected to the measuring sensor. The measuring sensor consists of a normally conducting detector coil (9), which comprises preferably an inductance and a resistance. The inductive resistance of the detector coil is preferably greater than or equal to its resistance at a frequency of 100 kHz. The detector coil preferably comprises a magnetized core (8), preferably a ferrite core, whose permeability constant lies between 10 and 1000, and is preferably 100.; USE - For eddy current detection. ADVANTAGE - Avoids need for cooling of measuring sensor, and enables closer contact to measured object.

PA: (SIEI ) SIEMENS AG;

IN: BAER L; BECKER E; DAALMANS G; LOHMANN H; LUDWIG K;

FA: DE19748556-A1 20.05.1999;

CO: DE;

IC: G01N-027/90; G01R-033/035;

MC: S01-E01A3; S03-E11A;

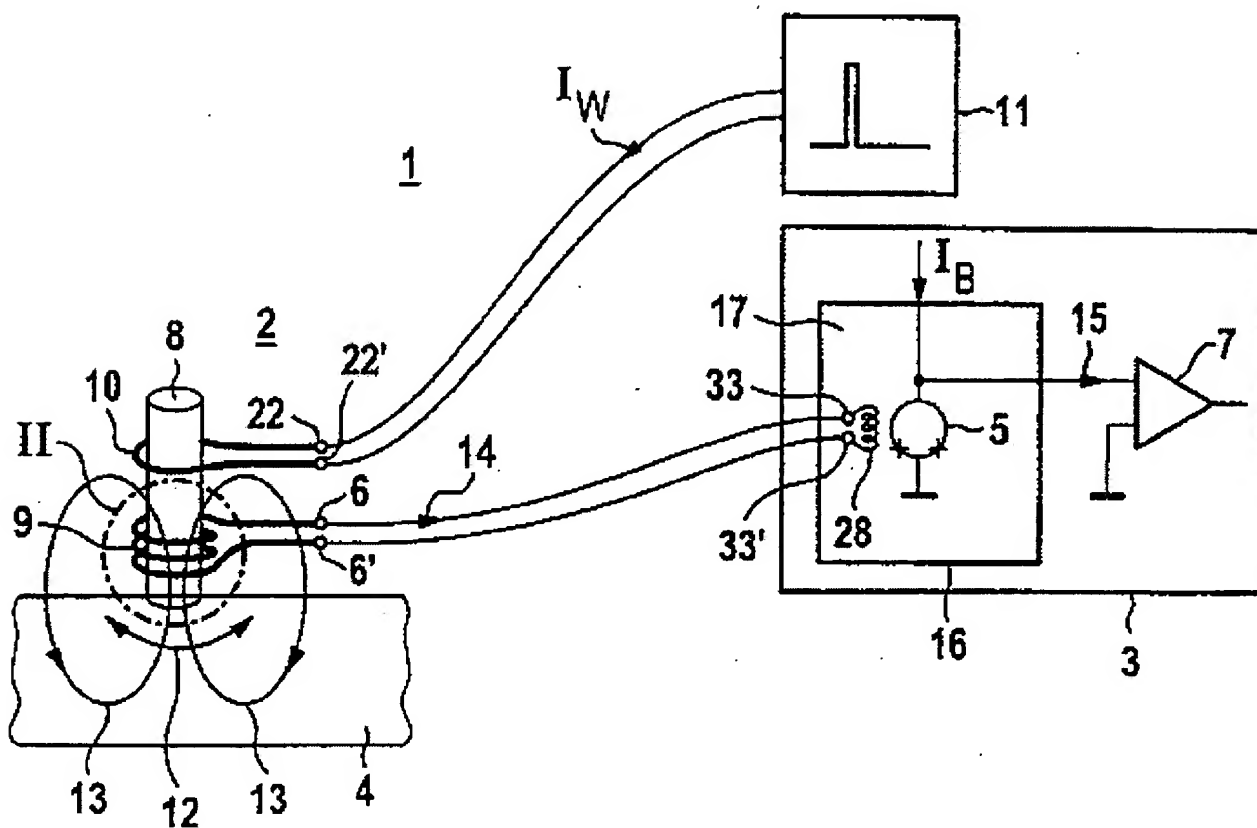
DC: S01; S03;

FN: 1999303597.gif

PR: DE1048556 04.11.1997;

FP: 20.05.1999

UP: 21.06.1999





①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 197 48 556 A 1**

⑤1 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**G 01 R 33/035**  
G 01 N 27/90

②1 Aktenzeichen: 197 48 556.1  
②2 Anmeldetag: 4. 11. 97  
④3 Offenlegungstag: 20. 5. 99

DE 197 48 556 A 1

⑦1 Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦2 Erfinder:  
Becker, Erich, Dr.rer.nat. Dipl.-Phys., 45770 Marl,  
DE; Lohmann, Hans-Peter, Dipl.-Ing., 46485 Wesel,  
DE; Ludwig, Klaus, Dipl.-Ing., 91058 Erlangen, DE;  
Daalmans, Gabriel, 91315 Höchstadt, DE; Bär,  
Ludwig, Dr.rer.nat. Dipl.-Phys., 91056 Erlangen, DE

⑤6 Entgegenhaltungen:

DE 1 96 32 234 A1  
DE 1 95 19 480 A1  
DE 44 37 431 A1

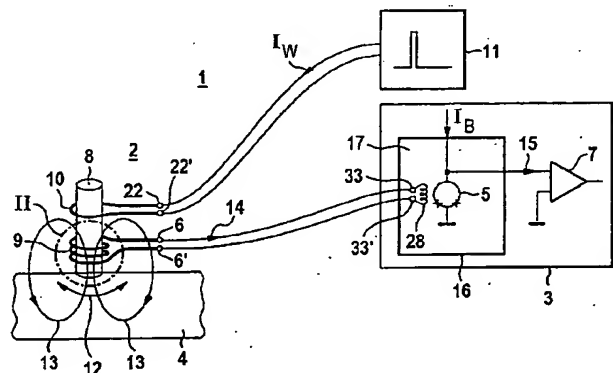
PODNEY, W.N.: Eddy Current Evaluation of  
Airframes Using Refrigerated SQUIDS, In:  
IEEE Transactions on Applied  
Superconductivity, Vol. 5, No. 2, 1995,  
S. 2490-2492;  
JP 2-78983 A., In: Pat. Abstr. of JP,  
P-1060, Vol. 14, No. 272, 1990;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Magnetfluß-Meßsystem zur Wirbelstromprüfung und Verfahren zur Wirbelstromprüfung

⑤7 Die Erfindung betrifft ein Magnetfluß-Meßsystem zur Wirbelstromprüfung mit einem Meßfühler (2) mit einer normal leitenden Detektorspule (9). Der Meßfühler (2) ist elektrisch verbunden mit einem zu einer Meßsignal-Verarbeitungseinheit (3) zugehörigen SQUID-Sensor (5). Bei einer Wirbelstromprüfung wird in einem elektrisch leitfähigen Prüfobjekt (4) ein Wirbelstrom (12) induziert. Das Magnetfeld (13) des Wirbelstroms (12) wird mit dem Meßfühler (2) erfaßt, wobei dieser ein Meßsignal (14) an den SQUID-Sensor (5) abgibt. Ein vom SQUID-Sensor (5) daraufhin abgegebenes SQUID-Meßsignal (15) dient als Grundlage zur Ermittlung von Fehlerstellen im Prüfobjekt.



DE 197 48 556 A 1

Die Erfindung betrifft ein Magnetfluß-Meßsystem zur Wirbelstromprüfung mit einem Meßfühler und einer Meßsignalverarbeitungseinheit, wobei die Meßsignalverarbeitungseinheit einen SQUID-Sensor aufweist, der mit dem Meßfühler elektrisch verbunden ist.

SQUID ist die Abkürzung für die englische Bezeichnung "Superconducting Quantum Interference Device". Ein SQUID-Sensor setzt als Wandler Magnetfluß in elektrische Spannung um, wobei zu seinem Aufbau supraleitende Materialien verwendet werden.

Ein solches Magnetfluß-Meßsystem ist bekannt aus dem Artikel von Walter N. Podney, "Eddy Current Evaluation of Airframes Using Refrigerated SQUIDS", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 5, No. 2, 07.1995, pp. 2490-2492. Bei dem beschriebenen Magnetfluß-Meßsystem zur Wirbelstromprüfung wird mit Hilfe einer von einem Wechselstrom durchflossenen Erregerspule in einem aus leitfähigem Material bestehenden Prüfobjekt ein Wirbelstrom induziert, dessen Magnetfeld, welches das zu messende Magnetfeld ist, mit Hilfe eines Meßfühlers erfaßt wird. Der Meßfühler gibt ein entsprechendes Meßsignal ab, welches über eine elektrische Verbindung einem zu der Meßsignalverarbeitungseinheit gehörenden SQUID-Sensor zugeleitet wird. Der SQUID-Sensor gibt ein entsprechendes SQUID-Meßsignal ab, welches in der Meßsignalverarbeitungseinheit weiter verarbeitet wird. Hierbei kann auf die Beschaffenheit des Prüfobjekts und auf Fehlerstellen im Prüfobjekt geschlossen werden.

Der Meßfühler und die elektrische Verbindung des beschriebenen Magnetfluß-Meßsystems sind supraleitend ausgeführt. Daher müssen sowohl Meßfühler, als auch elektrische Verbindung sowie SQUID-Sensor auf eine Temperatur gekühlt werden, bei der sich die Supraleitung ausbildet. Zu diesem Zweck befinden sich der Meßfühler, die elektrische Verbindung und der SQUID-Sensor in einem thermisch isolierten Gefäß, in dem ein Kühlmittel zu deren Kühlung vorhanden ist. Aufgrund der Tatsache, daß sich der Meßfühler in einem Gefäß befindet, ist er schwer handhabbar und kann nur mit einem nicht vernachlässigbaren Abstand in die Nähe einer Oberfläche des Prüfobjekts gebracht werden.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein alternatives Magnetfluß-Meßsystem anzugeben. Eine weitere Aufgabe ist es, ein Verfahren zur Wirbelstromprüfung anzugeben.

Erfindungsgemäß wird die auf ein Magnetfluß-Meßsystem gerichtete Aufgabe gelöst durch ein Magnetfluß-Meßsystem nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1, bei dem der Meßfühler eine normal leitende Detektorspule aufweist.

Vorteilhaft ist hierbei, daß sämtliche Kühlmaßnahmen und Apparaturen zur Kühlung des Meßfühlers entfallen. Des weiteren ist eine normalleitende Detektorspule in einem erheblich geringeren Abstand an die Oberfläche des zu untersuchenden Prüfobjektes ankoppelbar, wobei der verbleibende Abstand im wesentlichen durch die Dicke einer elektrischen Isolationschicht zwischen Meßfühler und Oberfläche gegeben ist.

Vorzugsweise weist die normalleitende Detektorspule eine Induktivität  $L$  und einen ohmschen Widerstand  $R$  so auf, daß bei einer Frequenz  $f = 100 \text{ kHz}$  der induktive Widerstand  $Z_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$  der Detektorspule gleich oder größer als der ohmsche Widerstand  $R$  ist. Die Frequenz  $f$  ist als untere Grenzfrequenz des Meßfühlers zu betrachten und entspricht somit einer minimal verwendbaren Frequenz eines Erregerstromes, mit dem die Erregerspule beaufschlagt werden kann. Je kleiner die Frequenz des Erregerstromes ist, umso größer ist die Eindringtiefe des mit der Erreger-

spule induzierten Wirbelstroms in das Prüfobjekt und umso tiefer können somit mit dem Meßfühler erfassbare Fehlerstellen liegen.

Bevorzugtermaßen weist die Detektorspule einen magnetisierbaren Kern, insbesondere einen Ferritkern auf, dessen Permeabilitätskonstante zwischen 10 und 1000, insbesondere bei 100 liegt. Mit Hilfe des magnetisierbaren Kerns kann die Induktivität der Detektorspule erheblich erhöht und damit die Frequenz  $f$  weiter erniedrigt werden. Der Kern dient weiterhin der Führung des zu messenden Magnetfeldes durch die Detektorspule, so daß das zu messende Magnetfeld nahezu jede Windung gleichermaßen durchdringt und die Detektorspule gut an das zu messende Magnetfeld angekoppelt ist.

Bevorzugtermaßen weist der Meßfühler eine Erregerspule und eine Detektorspule auf. Ein durch die Erregerspule fließender Wechselstrom kann gegebenenfalls aufgrund einer vorhandenen induktiven Verkopplung zwischen Erreger- und Detektorspule in letzterer einen Störstrom induzieren, der sich dem Meßsignal überlagert, was sich für die weitere Verarbeitung in der Meßsignalverarbeitungseinheit beeinträchtigend auswirken kann. Daher weist die Detektorspule vorzugsweise zwei Teilspulen auf. Der Meßfühler ist so ausgeführt, daß jede Teilspule mit der Erregerteilspule induktiv über dadurch gebildete Gegeninduktivitäten verkopplt ist, wobei die Gegeninduktivitäten möglichst gleich groß sind. Die induktiven Verkopplungen sind derart ausgeführt, daß ein durch die Erregerspule fließender Wechselstrom in den Teilspulen jeweils einen Teilstrom induziert, wobei die Teilströme gegensinnig gerichtet sind. Ein durch das Feld der Erregerspule in der Detektorspule erzeugter Störstrom, welcher der Summenstrom der Teilströme ist, ist somit sehr gering, da sich die Teilströme zum Teil gegenseitig aufheben.

Durch den Aufbau des Meßfühlers bedingt können die Gegeninduktivitäten gegebenenfalls leicht unterschiedlich sein, was zu unterschiedlich großen Teilströmen führt, so daß keine vollständige gegenseitige Aufhebung der Teilströme gegeben ist und somit deren verbleibende Summe als Störstrom verbleibt. Bevorzugtermaßen weist daher die Erregerspule zwei Erregerteilspulen auf, wobei jede Erregerteilspule mit jeweils einer Teilspule so verkopplt ist, daß die induzierten Teilströme ebenfalls gegensinnig gerichtet sind. Die Erregerteilspulen sind mit einem Widerstandsnetzwerk verbunden, welches mindestens einen veränderbaren Widerstand aufweist. Mit Hilfe des veränderbaren Widerstandes sind sich in den Erregerteilspulen ausbildende Erregerteilströme so einflußbar, daß die jeweiligen Beträge der Teilströme weitestgehend gleich groß eingestellt werden können, so daß sich die Teilströme nahezu aufheben, was als Abgleich bezeichnet wird. Nach einem Abgleich induziert ein durch die Erregerspule fließender Wechselstrom nahezu keinen Störstrom in der Detektorspule. Weiterhin bevorzugt sind die zwei Teilspulen parallel zueinander geschaltet, weisen entgegengesetzten Wicklungssinn sowie jeweils gleiche Induktivität auf, und die Erregerteilspulen sind in Serie geschaltet, weisen gleichen Wicklungssinn sowie ebenfalls jeweils gleiche Induktivität auf.

In einer weiter bevorzugten Ausführung ist die Detektorspule des Meßfühlers als Flachspule ausgebildet. Hierbei werden mit einem heiter mehrere Windungen nebeneinander auf einem flachen Substrat gebildet, wobei die Windungen die Flachspule bilden. Vorteilhaft an dieser Gestaltung des Meßfühlers ist, daß jede Windung der Flachspule mit einem geringen Abstand an das Prüfobjekt angekoppelt werden kann. Ebenso durchdringt das zu messende Magnetfeld jede Windung der Flachspule, so daß diese ebenfalls gut an das zu messende Magnetfeld angekoppelt ist, ohne daß ein

magnetisierbarer Kern zum Einsatz kommt. Dadurch weist die als Flachspule ausgebildete Detektorspule eine hohe Empfindlichkeit auf.

Bevorzugtermaßen weist der elektrische Leiter mit dem die das Meßsignal liefernde Flachspule gebildet wird, einen Leiterdurchmesser auf, wobei zwei benachbarte Windungen einen Abstand zueinander aufweisen, der größer als der Leiterdurchmesser ist. Durch diese Maßnahme wird die zwischen den Windungen befindliche Fläche der Flachspule, die bei einer Erfassung eines Magnetfeldes mit einem Magnetfluß durchströmbare ist, vergrößert und gleichzeitig aufgrund des größeren Abstandes der Windungen zueinander die Gesamtinduktivität der Flachspule verringert. Ein aufgrund eines zu messenden Magnetfeldes in der Flachspule induzierter Strom ist somit größer, als bei einer Spule, die die gleiche mit einem Magnetfluß durchströmbare Fläche aufweist, aber aufgrund der unmittelbaren Nähe ihrer Windungen zueinander und einer damit verbundenen größeren magnetischen Verkopplung der Windungen eine größere Induktivität besitzt.

Vorzugsweise wird der Leiter der Flachspule unter Anwendung von fotolithographischen, drucktechnischen, ätztechnischen oder auch rein mechanische Verfahren durch Strukturierung einer leitfähigen Schicht, welche sich auf einem nichtleitfähigen Substrat befindet, gebildet. Eine solche Anordnung ist in großen Stückzahlen und in Abmessungen mit geringen Toleranzen herstellbar.

In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform weist die Meßsignalverarbeitungseinheit eine Leiteranordnung und der SQUID-Sensor eine supraleitende Antenne auf, wobei die Leiteranordnung für eine positive Rückkopplung zur Vergrößerung eines Spannungssignals des SQUID-Sensors induktiv mit der Antenne gekoppelt ist. Ein vom SQUID-Sensor geliefertes Spannungssignal bewirkt einen Stromfluß durch die Leiteranordnung. Aufgrund des Stromflusses wird über die induktive Kopplung in der supraleitenden Antenne ein Strom induziert, der wiederum auf den SQUID-Sensor so zurückwirkt, daß das vom SQUID-Sensor gelieferte Spannungssignal vergrößert wird. Dies ist als eine positive Rückkopplung zu verstehen. Der SQUID-Sensor weist durch diese Maßnahme eine erhöhte Empfindlichkeit auf.

Vorzugsweise weist die Leiteranordnung einen normalleitenden Leiter und einen supraleitenden Leiter auf, wobei der supraleitende Leiter induktiv mit der Antenne gekoppelt ist. Der normalleitende Leiter bildet einen ohmschen Widerstand, wobei durch die Größe des ohmschen Widerstandes die Stärke des aufgrund des Spannungssignals in der Leiteranordnung hervorgerufenen Stromes beeinflusst wird und damit die Stärke der Rückkopplung eingestellt wird.

Die auf das Verfahren zur Wirbelstromprüfung gerichtete Aufgabe wird durch ein Verfahren gelöst, bei dem in einem Prüfobjekt aus elektrisch leitfähigem Material, welches Fehlerstellen mit einer Tiefe und einer Breite aufweisen kann, ein Wirbelstrom induziert wird, dessen Magnetfeld durch einen Meßfühler erfaßt wird und in diesem ein Meßsignal hervorruft, welches einem SQUID-Sensor in einer Meßsignalverarbeitungseinheit zugeleitet wird, von diesem in ein SQUID-Meßsignal gewandelt und auf der Grundlage des SQUID-Meßsignals zur Ermittlung von Fehlerstellen, insbesondere derer Tiefen, ein Vergleich mit Referenzsignalen durchgeführt wird.

Vorzugsweise wird bei dem Verfahren ein Referenzsignal mittels einer Referenz-Wirbelstromprüfung an einem Referenzobjekt aus dem elektrisch leitfähigem Material ermittelt, welches eine in ihren Abmessungen, insbesondere der Tiefe, bekannte Referenzfehlerstelle aufweist.

Anhand der in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispiele wird das Magnetfluß-Meßsystem näher erläutert.

Es zeigen schematisiert und teilweise nicht maßstäblich unter Darstellung der für die Erläuterung verwendeten konstruktiven und funktionellen Merkmale:

Fig. 1 ein Magnetfluß-Meßsystem für eine Wirbelstromprüfung,

Fig. 2 den in Fig. 1 spezifizierten Ausschnitt mit dem Meßfühler,

Fig. 3 ein Ersatzschaltbild der Detektorspule des Meßfühlers,

Fig. 4 ein mit Flachspulen ausgeführter Meßfühler,

Fig. 5 ein abgleichbarer Meßfühler und

Fig. 6 eine Draufsicht auf einen schematisiert dargestellten SQUID-Sensor.

Die Bezugszeichen sämtlicher Figuren haben jeweils die gleiche Bedeutung.

Die Fig. 1 zeigt ein Magnetfluß-Meßsystem 1 zur Wirbelstromprüfung. Das Magnetfluß-Meßsystem 1 weist einen Meßfühler 2 und eine Meßsignalverarbeitungseinheit 3 auf. Der Meßfühler 2 befindet sich in der Nähe eines zu untersuchenden Prüfobjektes 4, welches aus elektrisch leitfähigem Material besteht. Die Meßsignalverarbeitungseinheit 3 weist einen SQUID-Sensor 5 auf, mit welchem der Meßfühler 2 elektrisch verbunden ist. Der SQUID-Sensor 5 ist mit einem Verstärker 7 und mit weiteren nicht näher dargestellten Signalverarbeitungsstufen verbunden. Der Meßfühler 2 weist einen Ferritkern 8 auf, auf den eine normalleitende Detektorspule 9 aufgewickelt ist, welche die Anschlußklemmen 6 und 6' aufweist. Weiterhin ist auf den Ferritkern 8 eine Erregerspule 10 gewickelt, die mit einem Signalgenerator 11 elektrisch verbunden ist.

Zur Untersuchung des Prüfobjektes 4 wird über ein Magnetfeld der Erregerspule 10 in dem Prüfobjekt 4 ein Wirbelstrom 12 induziert. Dazu wird die Erregerspule 10 mit einem vom Signalgenerator 11 gelieferten hochfrequenten Wechselstrom  $I_w$  beaufschlagt. Ein vom Wirbelstrom 12 erzeugtes Magnetfeld 13 wird mit Hilfe der normal leitenden Detektorspule 9 des Meßfühlers 2 erfaßt, in der ein entsprechender Strom induziert wird. Dieser induzierte Strom wird als Meßsignal 14 dem SQUID-Sensor 5 zugeleitet. Mit Hilfe des SQUID-Sensors 5 wird das Meßsignal 14 in ein SQUID-Meßsignal 15 gewandelt, welches dem nachfolgenden Verstärker 7 zur weiteren Verarbeitung zugeleitet wird. Der SQUID-Sensor 5 befindet sich in einem thermischen Isolationsgefäß 16, welches mit einem Kühlmittel 17 gefüllt ist. Mit Hilfe des Kühlmittels 17 wird der SQUID-Sensor 5 auf eine Temperatur gekühlt, bei der seine supraleitende Eigenschaft gewährleistet ist.

Vorteilhaft an der Verwendung einer normal leitenden Detektorspule 9 im Meßfühler 2 ist, daß aufwendige Kühlmaßnahmen zur Kühlung des Meßfühlers 2 entfallen. Mit dem Wegfall aufwendiger Kühlmaßnahmen wird eine höhere Flexibilität und eine leichtere Handhabbarkeit des Meßfühlers 2 beim Einsatz erreicht. Des weiteren ist der Meßfühler 2 in einem geringen Abstand zu einer nicht näher dargestellten Oberfläche des Prüfobjektes 4 positionierbar, wobei der geringe Abstand durch das Vorhandensein einer nicht näher dargestellten elektrischen Isolationsschicht zwischen Meßfühler und der Oberfläche bedingt ist.

Fig. 2 zeigt vergrößert den in Fig. 1 dargestellten Meßfühler 2. Hierbei ist die normalleitende Detektorspule 9 mit ihren Klemmen 6 und 6' und dem Ferritkern 8 dargestellt. Die normalleitende Detektorspule 9 ist als ein Leiter 18, der in mehreren Windungen 19 um den Ferritkern 8 gewickelt ist, ausgeführt.

Fig. 3 zeigt das elektrische Ersatzschaltbild der normalleitenden Detektorspule 9. Das Ersatzschaltbild der Detektorspule 9 weist eine Induktivität L in Serie geschaltet zu einem ohmschen Widerstand R auf. Mit dem ohmschen Wi-

derstand  $R$  wird der ohmsche Widerstand des Leiters **18** nachgebildet. Die Detektorspule **9** ist dabei so aufgebaut, daß bei einer Frequenz  $f$  von 100 kHz der induktive Widerstand  $Z_L$  der Spule  $L$  gegeben durch  $Z_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$  gleich oder größer als der ohmsche Widerstand  $R$  ist. Die Frequenz  $f$  beeinflusst dabei eine untere Grenzfrequenz für den Einsatz des Meßfühlers.

In Fig. 4 ist ein Ausführungsbeispiel der Detektorspule **9** als eine Flachspule **20** dargestellt, die sich auf einem Substrat **21** befindet. Des weiteren weist der Meßfühler **2** eine als Flachspule ausgeführte Erregerspule **10** mit den Klemmen **22** und **22'** auf. Die Flachspule **20** weist mehrere mit einem elektrischen Leiter **18** gebildete Windungen **19** auf, die zueinander einen Abstand **23** aufweisen. Der Leiter **18** weist einen Leiterdurchmesser **24** auf. Der Abstand **23** zwischen benachbarten Windungen **19** ist größer als der Leiterdurchmesser **24**. Vorteilhaft an einer Ausführung der Detektorspule **9** des Meßfühlers **2** als Flachspule **20** ist, daß die Flachspule **20** mit all ihren Windungen **19** nahezu abstands-frei an eine Oberfläche eines nicht näher dargestellten Prüfobjekts **4** (siehe z. B. Fig. 1) gebracht werden kann. Der verbleibende Abstand zum Prüfobjekt **4** wird hier bestimmt durch eine Dicke einer nicht näher dargestellten elektrischen Isolationsschicht zwischen den Windungen **19** und der Oberfläche.

Bei einer Ausführung der Flachspule **20** mit dem Abstand **23** zwischen den Windungen **19** weist die Flachspule **20** eine geringe Induktivität  $L_F$  auf, wobei die mit den Windungen **19** aufgespannte Fläche **25** sehr groß ist. Ein Vorteil ist, daß ein durch die Fläche **25** strömender zeitlich veränderlicher Magnetfluß eines zu messenden Magnetfeldes in den Windungen **19** der Flachspule **20** somit einen sehr hohen Strom  $I_F$ , der als Meßsignal **14** dient, induziert. Würden die Windungen **19** der Flachspule **20** einen geringeren Abstand als den Abstand **23** aufweisen, so wäre deren Induktivität größer. Weiterhin wäre die mit den Windungen **19** umfaßte Fläche kleiner, als die Fläche **25**. Somit wäre mit dieser Spulenordnung bei höherer Induktivität nur ein geringerer zeitlich veränderlicher Fluß des zu messenden Magnetfeldes erfaßbar, wobei ein viel kleinerer Strom in den Windungen **19** induziert und als Meßsignal **14** zur Verfügung stehen würde. Eine solche Spule besäße somit eine geringere Empfindlichkeit, als die in Fig. 4 dargestellte Flachspule **20**.

In Fig. 5 ist ein abgleicher Meßfühler **2** dargestellt. Er weist eine als Flachspule ausgeführte Erregerspule **10** mit den Klemmen **22** und **22'** und eine zur Erfassung eines zu messenden Magnetfeldes dienende Detektorspule **33** mit den Klemmen **6** und **6'** auf, die ebenfalls als Flachspule ausgeführt ist. Die Detektorspule **33** weist zwei parallelgeschaltete Teilspulen **34** und **34a** auf, die entgegengesetzten Wicklungssinn und gleiche Induktivitäten  $L_1$  besitzen. Die Erregerspule **10** wird gebildet aus zwei in Serie geschalteten Erregerteilspulen **35** und **35a**, die gleichen Wicklungssinn und gleiche weitere Induktivitäten  $L_2$  aufweisen. Jeder Erregerteilspule **35** und **35a** ist jeweils ein Widerstand  $R_1$ , bzw.  $R_2$  parallelgeschaltet, wobei der Widerstand  $R_1$  in einen Abgleich in dem Bereich  $R_2 - \Delta R \leq R_1 \leq R_2 + \Delta R$  einstellbar ist. Mit den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  wird ein Widerstandsnetzwerk **36** gebildet. Die Erregerteilspulen **35** und **35a** sind jeweils mit den Teilspulen **34** bzw. **34a** induktiv über Gegeninduktivitäten  $M_1$ , bzw.  $M_2$  verkoppelt. Die Gegeninduktivitäten  $M_1$  und  $M_2$  können durch den Aufbau des Meßfühlers **2** bedingt unterschiedlich sein. Ein in die Klemme **22** eingespeister Erregerstrom  $I_E$  teilt sich entsprechend der Werte  $R_1$  und  $L_2$ , bzw.  $R_2$  und  $L_2$  in die Ströme  $I_{R1}$  und  $I_{E1}$ , bzw.  $I_{R2}$  und  $I_{E2}$  auf. Die Stärke des Stromes  $I_{R1}$  und damit die Stärke des Stromes  $I_{E1}$  kann durch Variation des Widerstandes  $R_1$  verändert werden. Somit ist die Stärke des Stromes  $I_{E1}$  so

einstellbar, das über die Gegeninduktivitäten  $M_1$  und  $M_2$  in den Teilwicklungen **34** und **34a** induzierte Teilströme  $I_{D1}$ , bzw.  $I_{D2}$  nahezu gleich groß sind. Die Art der induktiven Verkopplung zwischen den jeweiligen Erregerteilspulen **35** und **35a** und den Teilspulen **34** bzw. **34a** ist so ausgeführt, das die Teilströme  $I_{D1}$  und  $I_{D2}$  entgegengesetzte Flußrichtung aufweisen und sich somit weitgehend aufheben, so daß nur ein nahezu verschwindender Störstrom  $I_S$  an der Klemme **6** abgreifbar ist. Eine Ausbildung eines Störstrom  $I_S$  in der Detektorspule **33** aufgrund des Erregerstromes  $I_E$  ist somit nahezu vollständig vermieden und der Meßfühler **2** ist dazu auf einen minimalen Störstrom  $I_S$  abgleichbar.

In Fig. 6 ist schematisch ein SQUID-Sensor **5** dargestellt. Der SQUID-Sensor **5** weist zwei SQUID-Fluß-Wandler **26a** und **26b** auf, die elektrisch an eine supraleitende Antenne **27** angekoppelt sind. Mit Hilfe von Gleichströmen  $I_{B1}$  und  $I_{B2}$ , die über die SQUID-Fluß-Wandler **26a** und **26b** zu nicht näher spezifizierten Massekontakten **30** fließen, wird der jeweilige Arbeitspunkt der SQUID-Fluß-Wandler **26a** und **26b** eingestellt. Eine Einkoppelspule **28** ist induktiv mit der supraleitenden Antenne **27** verkoppelt. Ein durch die Einkoppelspule **28** fließender Strom  $I_E$  induziert in der supraleitenden Antenne **27** einen Strom  $I_Q$ , der über jeweils einen Teil der SQUID-Fluß-Wandler **26a** und **26b** fließt. Dabei geben die SQUID-Fluß-Wandler **26a** und **26b** in Beziehung zu dem Strom  $I_Q$  jeweils ein Spannungssignal  $V_{S1}$  und  $V_{S2}$  ab. Der SQUID-Fluß-Wandler **26a** ist mit einer Leiteranordnung **31**, die einen induktiven Leiter **32** und einen normalleitenden, in der Zeichnung symbolisch mit einem Widerstand  $R$  dargestellten Leiter, elektrisch verbunden. Der induktive Leiter **32** ist induktiv mit der supraleitenden Antenne **27** gekoppelt. Ein vom SQUID-Fluß-Wandler **26a** erzeugtes Spannungssignal  $V_{S1}$  erzeugt einen Strom  $I_L$  über die Leiteranordnung **31**. Aufgrund der induktiven Verkopplung zwischen dem Leiter **32** und supraleitender Antenne **27**, wird der Strom  $I_Q$  in der supraleitenden Antenne **27** erhöht, wodurch das Spannungssignal  $V_{S1}$  vergrößert wird. Dieses Verhalten wird als positive Rückkopplung bezeichnet. Durch die Rückkopplung über die Leiteranordnung **31** wird somit die Empfindlichkeit des SQUID-Sensors **5** erhöht. Durch die Wahl der Größe des ohmschen Widerstandes **12** kann auf die Stärke des Stromes  $I_L$  und damit auf das Maß der Rückkopplung Einfluß genommen werden.

Das Verfahren zur Wirbelstromprüfung wird anhand der Fig. 1 erläutert. In einem Prüfobjekt **4** aus leitfähigem Material, welche unbekannte Fehlerstellen aufweisen kann, wird ein Wirbelstrom **12** induziert, dessen Magnetfeld **13** mit Hilfe einer Detektorspule **9** eines Meßfühlers **2** erfaßt wird. In der Detektorspule **9** wird durch das Magnetfeld **13** ein Meßsignal **14** hervorgerufen, welches einem SQUID-Sensor **5** in einer Meßsignalverarbeitungseinheit **3** zugeleitet wird. Von dem SQUID-Sensor **5** wird das Meßsignal **14** in ein SQUID-Meßsignal **15** gewandelt, welches SQUID-Meßsignal **15** in der Meßsignalverarbeitungseinheit **3** weiterverarbeitet wird. Dazu wird auf der Grundlage des SQUID-Meßsignals **15** ein Vergleich mit Referenzsignalen durchgeführt, wobei Fehlerstellen und deren Abmessungen ermittelt werden.

Ein Referenzsignal wird mittels einer Referenz-Wirbelstromprüfung gewonnen. Dazu wird das beschriebene Verfahren zur Wirbelstromprüfung angewendet auf ein bekanntes Prüfobjekt, ein sogenanntes Referenzobjekt, welches aus dem elektrisch leitfähigen Material besteht, aus dem spätere zu prüfende Prüfobjekte hergestellt sind. Das Referenzobjekt weist eine in ihren Abmessungen, insbesondere der Tiefe, bekannte Referenzfehlerstelle auf, die bei einer Referenz-Wirbelstromprüfung zur Ausbildung eines Referenzsignals führt.

1. Magnetfluß-Meßsystem (1) zur Wirbelstromprüfung mit einem Meßfühler (2) und einer Meßsignalverarbeitungseinheit (3), wobei die Meßsignalverarbeitungseinheit (3) einen SQUID-Sensor (5) aufweist, der mit dem Meßfühler (2) elektrisch verbunden ist **dadurch gekennzeichnet**, daß der Meßfühler (2) eine normalleitende Detektorspule (9) aufweist. 5
2. Magnetfluß-Meßsystem (1) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die normalleitende Detektorspule (9) eine Induktivität L und einen ohmschen Widerstand R aufweist, wobei bei einer Frequenz f von 100 kHz der induktive Widerstand  $Z_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$  der Detektorspule (9) gleich oder größer als der ohmsche Widerstand R ist. 15
3. Magnetfluß-Meßsystem (1) nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Detektorspule (9) einen magnetisierbaren Kern (8), insbesondere einen Ferritkern, aufweist, dessen Permeabilitätskonstante zwischen 10 und 1000, insbesondere bei 100 liegt. 20
4. Magnetfluß-Meßsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Meßfühler (2) eine Erregerspule (10) und eine Detektorspule aufweist (9), wobei die Detektorspule (9) zwei Teilspulen (34, 34a) aufweist und jede Teilspule (34, 34a) mit der Erregerspule (10) induktiv so verkoppelt ist, daß ein elektrischer Strom in der Erregerspule (10) in den Teilspulen (34, 34a) jeweils einen elektrischen Teilstrom ( $I_{D1}$ ,  $I_{D2}$ ) induziert, wobei die elektrischen Teilströme ( $I_{D1}$ ,  $I_{D2}$ ) gegensinnig gerichtet sind. 25
5. Magnetfluß-Meßsystem nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Erregerspule (10) zwei Erregerteilspulen (35, 35a) aufweist, wobei jede Erregerteilspule mit jeweils einer Teilspule (34, 34a) induktiv verkoppelt ist. 35
6. Magnetfluß-Meßsystem nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Teilspulen (34, 34a) parallel geschaltet sind und entgegengesetztem Wicklungssinn und jeweils gleiche Induktivität ( $L_1$ ) aufweisen und die Erregerteilspulen (35, 35a) in Serie geschaltet sind und gleichen Wicklungssinn und jeweils gleiche Induktivität ( $L_2$ ) aufweisen. 40
7. Magnetfluß-Meßsystem nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Erregerteilspulen (35, 35a) mit einem Widerstandsnetzwerk (36) verbunden sind, wobei das Widerstandsnetzwerk (36) mindestens einen veränderbaren Widerstand ( $R_1$ ) aufweist, durch den die sich in den Erregerteilspulen (35, 35a) ausbildenden Erregerteilströme ( $I_{E1}$ ,  $I_{E2}$ ) so beeinflussbar sind, daß die Teilströme ( $I_{D1}$ ,  $I_{D2}$ ) weitgehend gleichen Betrag aufweisen. 45
8. Magnetfluß-Meßsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Detektorspule (9) und/oder die Erregerspule (10) jeweils in Form einer Flachspule ausgebildet sind/ist. 50
9. Magnetfluß-Meßsystem (1) nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die als Flachspule (20) ausgebildete Detektorspule (9) einen elektrischen Leiter (18) mit einem Leiterdurchmesser (24) aufweist und mit dem Leiter (18) Windungen (19) gebildet sind, wobei zwei benachbarte Windungen (19) einen Abstand (23) zueinander aufweisen, der größer als der Leiterdurchmesser (24) ist. 60
10. Magnetfluß-Meßsystem (1) nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, daß der Leiter (18) der Flachspule (20) durch Strukturierung einer leitfähigen Schicht, welche sich auf einem nichtleitfähigen Sub-

strat befindet, gebildet ist.

11. Magnetfluß-Meßsystem (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßsignalverarbeitungseinheit (3) eine Leiteranordnung (31) und der SQUID-Sensor (5) eine supraleitende Antenne (27) aufweist und die Leiteranordnung (31) für eine positive Rückkopplung zur Vergrößerung eines Spannungssignals ( $V_{S1}$ ,  $V_{S2}$ ) des SQUID-Sensors (5) induktiv mit der Antenne (27) gekoppelt ist.

12. Magnetfluß-Meßsystem (1) nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Leiteranordnung (31) einen normalleitenden Leiter (R) und einen supraleitenden Leiter (32) aufweist, wobei letzterer induktiv mit der Antenne (27) gekoppelt ist.

13. Verfahren zur Wirbelstromprüfung, bei dem in einem Prüfobjekt (4) aus elektrisch leitfähigem Material, welches Fehlerstellen mit einer Tiefe und einer Breite aufweisen kann, ein Wirbelstrom (12) induziert wird, dessen Magnetfeld (13) durch einen Meßfühler (2) erfaßt wird und in diesem ein Meßsignal (14) hervorruft, welches einem SQUID-Sensor (5) in einer Meßsignalverarbeitungseinheit (3) zugeleitet wird, von diesem in ein SQUID-Meßsignal (15) gewandelt und auf der Grundlage des SQUID-Meßsignals (15) zur Ermittlung der Fehlerstellen, insbesondere derer Tiefen, ein Vergleich mit Referenzsignalen durchgeführt wird.

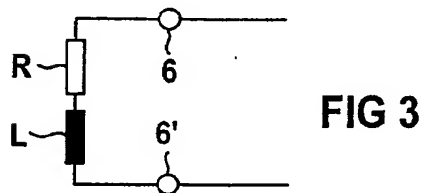
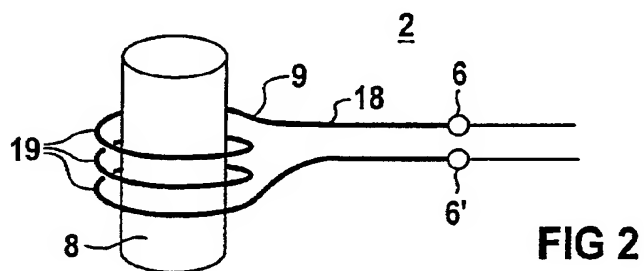
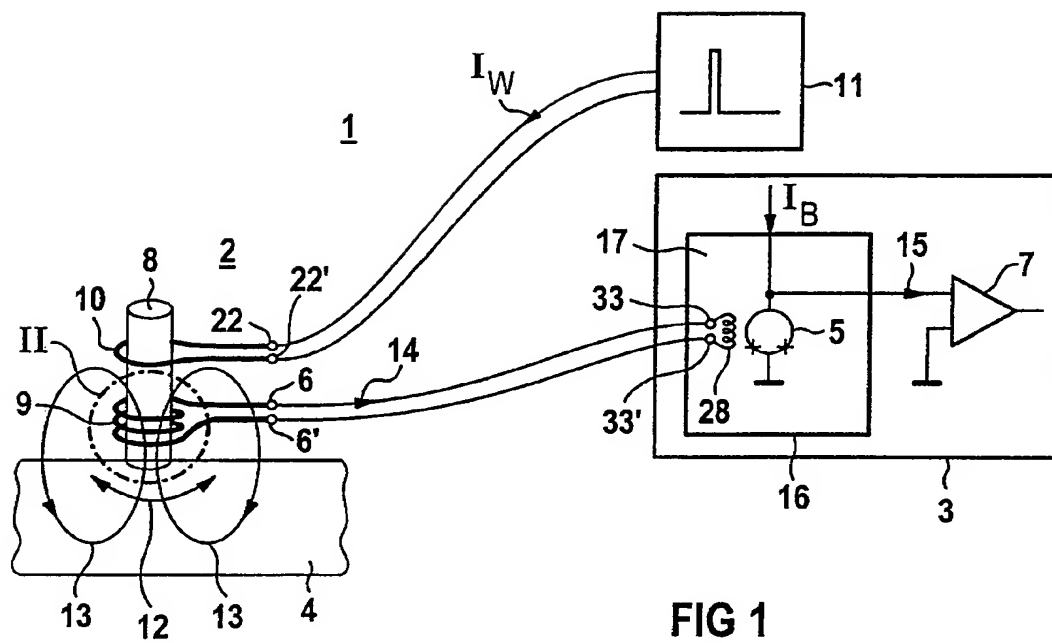
14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß ein Referenzsignal mittels einer Referenz-Wirbelstromprüfung an einem Referenzobjekt aus dem elektrisch leitfähigen Material ermittelt wird, welches zumindest eine in ihren Abmessungen, insbesondere der Tiefe, bekannte Referenzfehlerstelle aufweist.

---

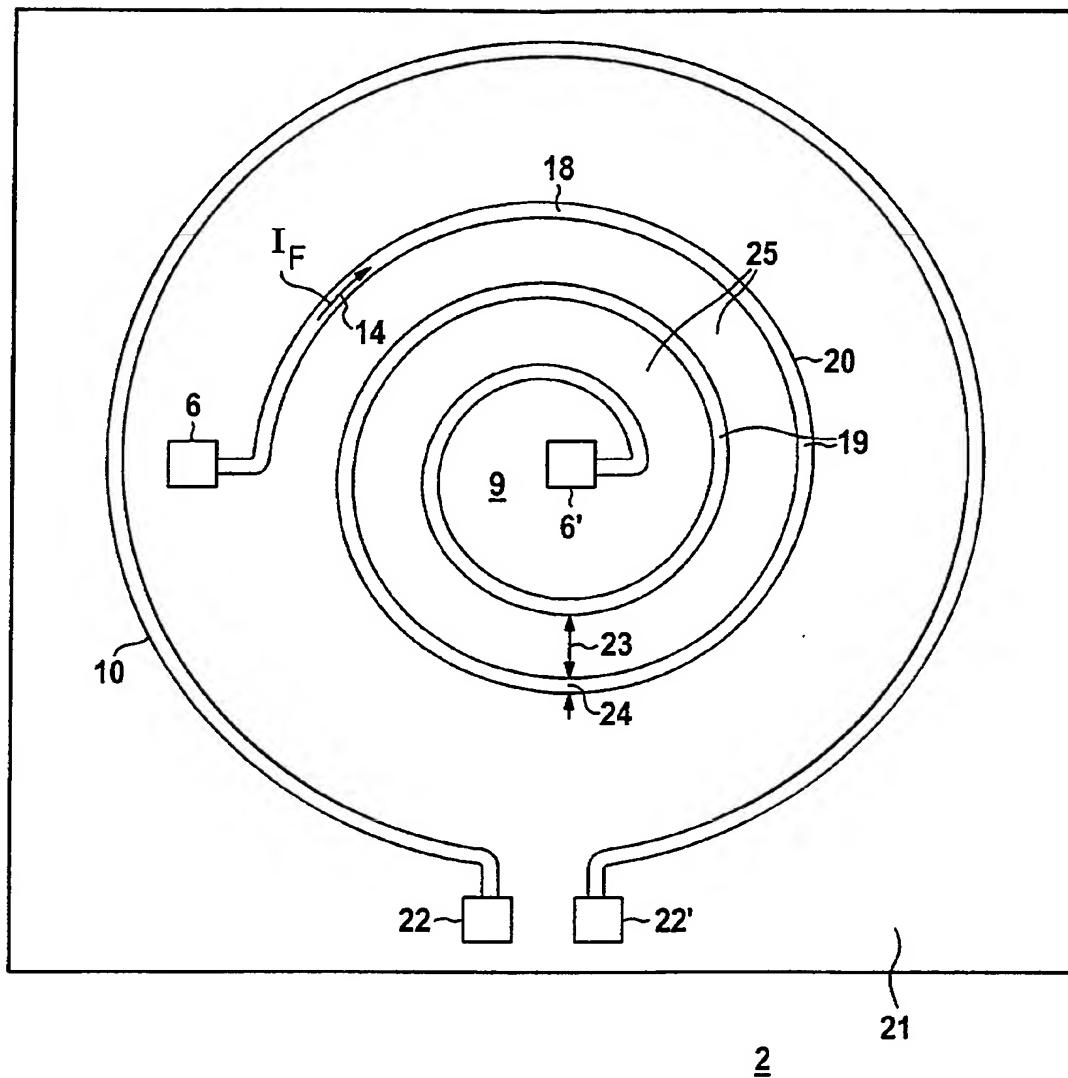
Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

---

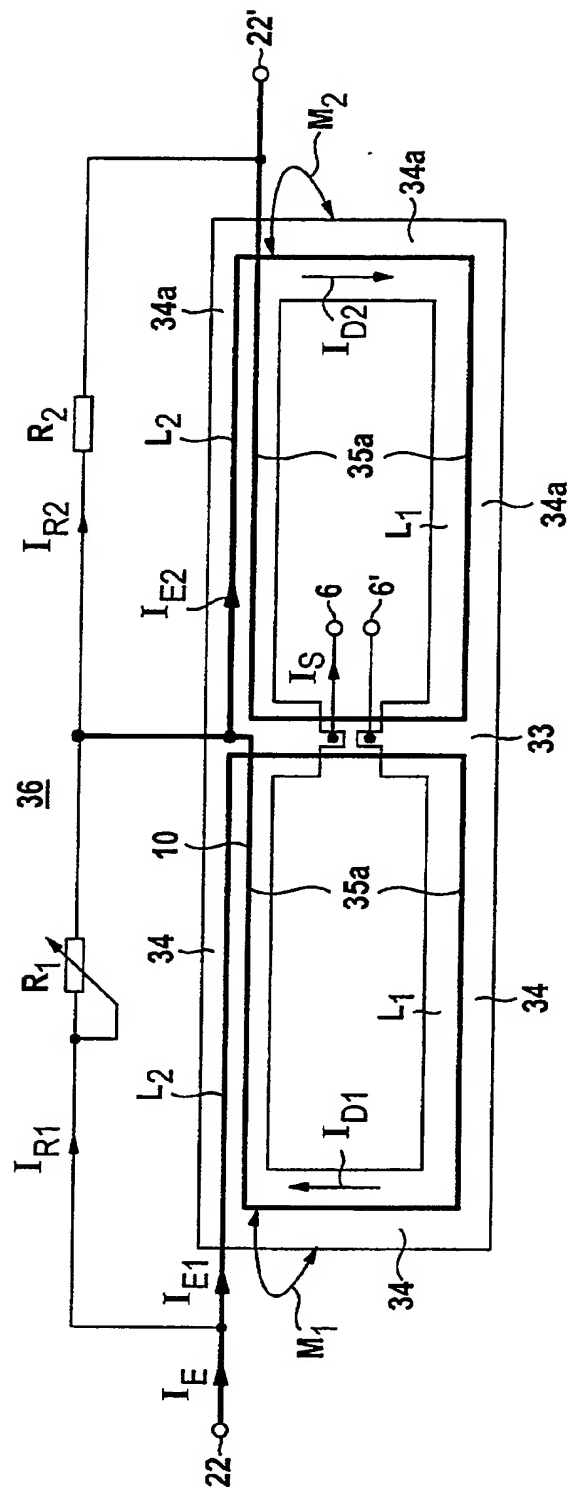
- Leerseite -







**FIG 4**



**FIG 5**

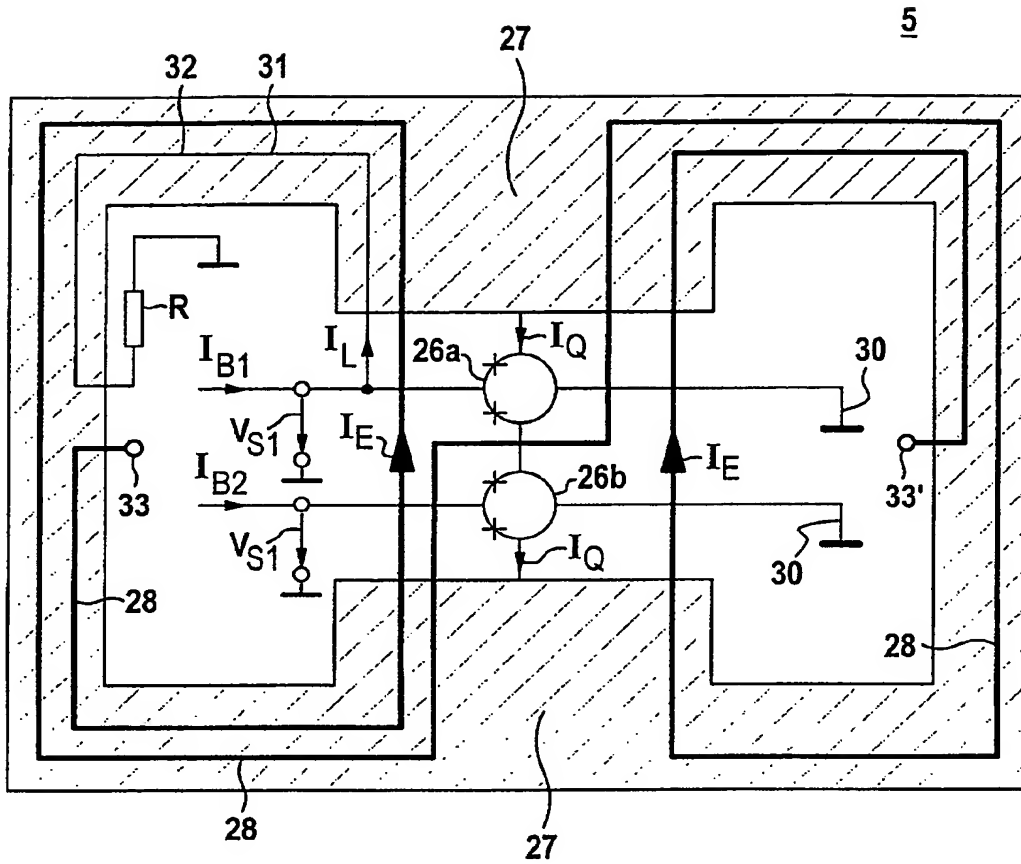


FIG 6